第 37 卷第 2 期 2017 年 1 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.2 Jan.,2017

DOI: 10.5846/stxb201508031635

蒲玉琳,叶春,张世熔,龙高飞,杨丽蓉,贾永霞, 徐小逊 李云.若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化.生态学报,2017,37(2):367-377.

Pu Y L, Ye C, Zhang S R, Long G F, Yang L R, Jia Y L, Xu X X, Li Y.Effects of different ecological restoration patterns on labile organic carbon and carbon pool management index of desertification grassland soil in zoige.Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):367-377.

若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化

蒲玉琳[1],叶 春[1],张世熔[2,*],龙高飞[3],杨丽蓉[4],贾永霞[1], 徐小逊[2], 李 云[1]

1 四川农业大学资源学院, 成都 611130

2 四川农业大学环境学院, 成都 611130

3 四川省地质矿产勘查开发局成都水文地质工程地质队, 成都 610072

4 四川省若尔盖县环境保护和林业局, 若尔盖 624500

摘要:研究退化林草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳和碳库管理指数变化,可为评价生态恢复措施提升土壤质量的效果,以及优化生态恢复模式的选择提供重要参考。结合野外调查和室内分析法,研究了若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤有机碳组分及碳库管理指数变化。若尔盖沙化草地的生态恢复模式有:灌草间作模式Ⅰ(条带状红柳间植草本植物,SGⅠ)、灌草间作模式Ⅱ(环状红柳间植草本植物,SGⅡ)、沙障+灌草模式(红柳沙障+红柳间植草本植物,SBSG)。结果表明,与沙化草地(DG)相比,3 种恢复模式都能提高土壤有机碳及其活性组分含量。SGⅠ模式的全剖面土壤微生物量碳(MBC)、溶解性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)含量分别增加 36.6%、139.0%、89.4%、130.9%; SGⅡ模式的分别增加 2.7%、-43.9%、15.0%、49.7%;SBSG 模式的分别增加 82.4%、21.8%、56.2%、170.3%。表明 SGⅠ与 SBSG 提高土壤有机碳的效应相近,而且二者都远大于 SGⅡ。3 种生态恢复模式土壤活性有机碳分配比例与 DG 的差异表现不一致,显著体现是 SGⅠ模式土壤 DOC 分配比例的垂直变化出现分馏现象。3 种生态恢复模式土壤碳库管理指数(CPMI)均大于 100%,能不同程度地提升土壤质量,其效应大小为 SGⅠ>SGⅡ>SBSG。易氧化有机碳可作为反映沙化草地生态修复模式土壤质量变化的优选指标,CPMI 也可用于表征生态恢复措施提升沙化草地土壤质量的效果。

关键词:若尔盖;沙化草地;生态恢复;土壤; 活性有机碳;碳库管理指数

Effects of different ecological restoration patterns on labile organic carbon and carbon pool management index of desertification grassland soil in zoige

PU Yulin[1], YE Chun[1], ZHANG Shirong[2, *], LONG Gaofei[3], YANG Lirong[4], JIA Yongxia[1], XU Xiaoxun[2], LI Yun[1]

1 *College of Resources*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*

2 *College of Environment*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*

3 *Chengdu Hydrogeological and Engineering Geological Team*,*Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration*, *Chengdu* 610072, *China*

4 *Zoige Bureau of Environmental Protection and Forestry*, *Zoige* 624500, *China*

Abstract: The changes of soil labile organic carbon and Carbon pool management index (CMPI) under different ecological restoration patterns can provide valuable information for evaluating the effects of ecological restoration measures on soil quality improvement, and screening optimized ecological restoration patterns on desertification forest and grassland. In this

基金项目:四川省教育厅资助项目(14ZB0011);国家自然科学基金资助项目(41401328);四川省科技支撑计划资助项目(2014NZ0044)

收稿日期:2015-08-03; **网络出版日期**:2016-06-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: rsz01@ 163

study, soil labile organic carbon fractions and CPMI were investigated by applying field investigations and laboratory analyses to desertification grassland receiving different patterns of ecological restoration in Zoige. Three main ecological restoration patterns were used to control desertification of grassland in Zoige, including shrub-grass intercrop pattern I (stripe *Tamarix ramosissima* incteropping herbs, such as *Poa pratensis*, *Elymus nutan* and *Ajuga lupulina*, SGI), shrub-grass intercrop pattern II (circular *Tamarix ramosissima* incteropping herbs, such as *Poa pratensis*, *Cremanthodium reniforme*, *Cirsium japonicum*, *Daucus carota* and *Vicia sepium*, SGII), and the sand-barrier plus shrub-grass intercrop pattern (the sand-barriers of *Tamarix ramosissima* plus *Tamarix ramosissima* incteropping herbs, such as *Tamarix ramosissima*, *Poa pratensis*, *Elymus nutan*, *Ajuga lupulina*, *Daucus carota*, SBSG).The results showed that the values of soil organic carbon and its labile fractions contents were higher in the three ecological restoration grasslands than in the desertification grassland without ecological restoration measures (DG). Compared to the DG, the contents of soil microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon(DOC), easily oxidized organic carbon(EOC), and particulate organic carbon(POC) in whole profile under the SGI pattern were increased by 36.6%, 139.0%, 89.4%, 130.9%, respectively, and those in the SGII pattern were increased by 2.7%, −43.9%, 15.0%, 49.7%, respectively, and those in the SBSG pattern were increased by 82.4%, 21.8%, 56.2%, 170.3%, respectively. This indicated that the ecological restoration patterns of SGI and SBSG were similarly effective at improving soil organic carbon, and both were superior to the SGII pattern. The distributed proportions of soil active organic carbon between the three ecological restoration and desertification grassland were difference, for instance the distributed proportion of DOC presented a vertical fractionation in the SGI pattern. The values of CPMI under three ecological restoration patterns were exceeded 100%. This implied that soil quality can be improved by the three ecological restoration patterns, and the order of the improved level was SGI (CPMI, 182.5%) > SGII (CPMI, 157.1%) > SBSG (CPMI, 129.9%). The results suggest that soil easily oxidized organic carbon can be used as an optimized index to reflect changes of soil quality in different ecological restoration grasslands, and soil CPMI can be used to characterize the improved effectiveness of ecological restoration measures on soil quality.

Key Words: Zoige; desertification grassland; ecological restoration; soil; labile organic carbon; carbon pool management index

土壤有机碳是植物所需养分和土壤微生物生命活动的能量来源，对改善土壤肥力[1-2]、降低土壤有机与无机污染[3-4]、缓减全球温室效应[5-6]具有重要作用。虽然土壤活性有机碳，特别是微生物碳与可溶性有机碳占总有机碳比例一般较小[7-8]，但可显著影响土壤形成过程与生物化学过程。土壤活性有机碳受退化土地生态恢复措施、土壤施肥与耕作方式等的影响[9-11]，能在总有机碳变化之前更敏感地反应土壤质量变化情况，是评价土壤质量的重要指标[9]。土壤碳库管理指数(Carbon pool management index，CPMI)是土壤有机碳和参考土壤有机碳的比值与土壤有机碳活度指数的乘积，综合考虑了土壤总有机碳与活性有机碳，可比活性有机碳更为灵敏地反映各种土地利用或管理措施引起的土壤质量下降或更新的程度[12-14]。

青藏高原东北边缘的若尔盖高原湿地，不仅是我国两大“母亲河”的水源涵养区和西北干旱区沙尘暴的有效隔离区，还是地球上的天然碳“库”与碳“汇”，土壤母质为第四纪松散沉积物。20 世纪 50 年代至 90 年代，由于开沟排水、过度放牧、鼠虫危害、气候暖干化[15]，湿地退化、草地沙化是该区域面临的两大生态环境问题。据若尔盖县土地沙化监测结果显示，自 1994 年以来，该县沙化土地持续增加，截止 2014 年已达 803018.2 hm^2(含露沙地 58713.8 hm^2)，占该县土地总面积的 7.69%。对此，自 20 世纪 90 年代中期开始，四川省政府启动了若尔盖县沙地综合治理的研究与示范点工程，已初现成效。因为多次的监测结果表明，该县沙化土地的年递增率逐渐降低，1999—2004 年的年增率 11.65%，2004—2009 年 10.88%、2009—2014 年 4.84%；极重度沙地(流动沙丘)自 2009 年后也降低(2009 年 5970.66 hm^2，2014 年 40405.6 hm^2)。

沙化草地在沙化治理初期，特别是流动沙丘，只有土壤环境恢复至适合植物生长的条件下，人工生态恢复

措施才能取得较好效果。短期内如何反映生态恢复措施使“土壤环境恢复至适合植物生长的条件”? 土壤活性有机碳及 CPMI 是首选、重要敏感指标。但迄今为止,对若尔盖高原乃至整个青藏高原沙化草地及其不同生态修复模式土壤有机碳与 CPMI 的研究,主要是关注不同沙化程度草地土壤[16]或不同恢复年限土壤总有机碳及其部分活性有机碳的变化[17],有的甚至仅在分析生态恢复模式对土壤理化性质的影响中涉及土壤有机碳含量特征[18-19],未曾有沙化草地不同恢复模式下土壤活性有机碳及 CPMI 的研究报道。因此,本文以若尔盖县重点沙化治理区,辖曼乡与黑河牧场的沙化草地不同生态恢复模式土壤为研究对象,探讨土壤有机碳及其活性组分、碳库管理指数的变化特征,对沙化草地的优化生态恢复模式的推广,实现高寒草地生态系统“增汇减排”,缓解全球变暖具有重要的意义。

1　研究区概况

研究区地理位置 33°33′—33°54′N,102°26′—102°35′E,海拔 3400—3600m,行政隶属若尔盖县西部的辖曼种羊场、辖曼乡与黑河牧场。该区域地貌有高原丘陵、湖群低洼地、河谷平原沼泽 3 类,黄河支流与黑河水系;属大陆性季风高原型气候区,具有寒带气候特征,无霜期平均 32d,年平均气温 1.6℃,年降水量 464.8mm,年蒸发量达 1013.0mm,相对湿度 64%,年大风日数 8d。植被以草甸与亚高山草甸植物为主,少量沼生与湿生植物;土壤类型以草甸土、亚高山草甸土为主,有部分沼泽土、泥炭土。近 20 年来,受自然和人为因素、鼠害的影响,区内沙化土地日益增多,沙丘侵吞了草场,有毒有害植物明显增加,牧草质量下降,阻碍了畜牧业生产的发展,也导致斑块状风沙土面积增大,甚至连绵不断,形成片状,如县道 u13 的唐克至黑河牧场段。

2　研究方法

2.1　样品采集

研究区内沙化草地的主要生态恢复模式有 3 种,分别是灌草间作模式Ⅰ(条带状高原红柳(*Tamarix ramosissima*)间植草本植物,SGⅠ)、灌草间作模式Ⅱ(环状高原红柳间植草本植物,SGⅡ)、沙障+灌草模式(高原红柳沙障+高原红柳间植草本植物,SBSG)。沙化草地不同生态恢复模式的典型样地选择与土壤样品采集:首先,野外实地踏勘结合 Google earth 的遥感影像图,选定 3 种沙化草地生态恢复模式的典型样地;然后,记录地形地貌、植被覆盖度、植被类型等基本情况(表 1);再后,依据微地形变化情况,每个样地布设 3 个采样点,每个采样点又设置 3 个 10m×10m 的小样方;最后,每个小样方在红柳林下与红柳林之间的草本植物带,采用剖面挖掘法采集 0—5、5—10、10—20、20—30、30—50、50—80 cm 土层土样,将各小样方相同土层土样混合均匀,带回约 600g 土样至室内供活性有机碳等指标测定。采集各沙化草地生态恢复模式土壤的同时,选择环境条件相近的植被覆盖近似为零的极重度沙化草地或裸沙地(DG)作为对照,共 3 个,其基本情况见表 1。

2.2　性质测定

土壤总有机碳(TOC)重铬酸钾容量法;溶解性有机碳(DOC) 1mol/L KCl(5:1)浸提,重铬酸钾容量法[20];易氧化有机碳(EOC)333mmol/L $KMnO_4$ 氧化-比色法[21];微生物量碳(MBC)氯仿熏蒸培养-K_2SO_4浸提,重铬酸钾容量法[22];颗粒有机碳(POC) 5 g/L ($(NaPO_3)_6$)超声波震荡分离,过 53um 筛,重铬酸钾容量法[23]。全氮、全磷、碱解氮与速效磷的测定方法分别是 $CuSO_4$-K_2SO_4-Se(100:1:1)消化半微量凯氏定氮法、H_2SO_4-$HClO_4$–钼锑抗比色法、碱解扩散法、$NaHCO_3$浸提–钼锑抗比色法[24]。微生物量氮氯仿熏蒸-K_2SO_4浸提,茚三酮比色法;微生物量磷氯仿熏蒸–$NaHCO_3$浸提,钼锑抗比色法[22]。

2.3　数据分析

碳库管理指数(CPMI)用于反映沙化草地不同生态恢复模式土壤质量的变化。以无生态恢复措施土壤碳库活度(A)和总有机碳(TOC)含量的平均值作为参考土壤的 A、TOC,计算沙化草地不同生态恢复模式土壤的 CPMI[21],具体计算方法式如下:

表 1 样地基本概况

Table 1 The basic situations of sampling plot

生态恢复模式 Ecological restoration pattern	样点号 Sample NO.	纬 度 Longitude/N	经度 Latitude/E	海拔 Altitude/m	恢复年限 restoration years/a	植被覆盖度 Vegetation coverage/%	主要植被 Domeinant vegetation
DG	DG1	33°51′38.43″	102°34′1.5″	3441	/	7	白苞筋骨草(*Ajuga lupulina*)、狼毒(*tellera chamaejasme*)、早熟禾(*Poa pratensis*)、蓟(*Cirsium japonicum*)、野胡萝卜(*Daucus carota*)、野豌豆(*Vicia sepium*)
	DG2	33°43′06.2″	102°29′28.1″	3444	/	10	
	DG3	33°43′16.73″	102°29′35.92″	3455	/	3	
SGⅠ	SGⅠ1	33°51′36.8″	102°34′01.5″	3497	7	65	红柳(*Tamarix ramosissima*)、早熟禾(*Poa pratensis*)、垂穗披碱草(*Elymus nutan*)、白苞筋骨草(*Ajuga lupulina*)
	SGⅠ2	33°51′35.2″	102°34′02.7″	3496	7	70	
	SGⅠ3	33°51′35.9″	102°34′02.8″	3496	7	60	
SGⅡ	SGⅡ1	33°43′17.7″	102°29′05.8″	3448	7	78	红柳(*Tamarix ramosissima*)、早熟禾(*Poa pratensis*)、垂头菊(*Cremanthodium reniforme*)、蓟(*Cirsium japonicum*)、野胡萝卜(*Daucus carota*)、野豌豆(*Vicia sepium*)
	SGⅡ2	33°43′19.5″	102°29′05.0″	3448	7	84	
	SGⅡ3	33°43′17.6″	102°29′04.6″	3450	7	88	
SBSG	SBSG1	33°44′34.6″	102°30′20.2″	3472	4	72	红柳(*Tamarix ramosissima*)、早熟禾(*Poa pratensis*)、垂穗披碱草(*Elymus nutan*)、白苞筋骨草(*Ajuga lupulina*)、野胡萝卜(*Daucus carota*)
	SBSG2	33°44′36.1″	102°29′47.7″	3485	4	71	
	SBSG3	33°44′38.5″	102°30′44.3″	3508	4	85	

DG:无生态恢复措施的沙化草地 Desertification grassland without ecological restoration measures; SG:沙化草地的灌草间作修复模式Ⅰ shrub-grass intercrop restoration patternⅠof desertification grassland; SGⅡ:沙化草地的灌草间作修复模式Ⅱ Shrub-grass intercrop restoration pattern Ⅱof desertification grassland; SBSG:沙化草地的沙障+灌草修复模式 Sand-barrier plus shrub-grass intercrop restoration pattern of desertification grassland

碳库活度(A)= EOC/(TOC-EOC)

碳库活度指数(CA)= 生态恢复模式土壤 A/参考土壤 A

碳库指数(CPI)= 生态恢复模式土壤 TOC/参考土壤 TOC

碳库管理指数(CPMI)= CPI×CA×100%

采用 Excel 2003 和 SPSS 11.0 软件进行数据统计分析,单因子方差分析(Oneway-AVOVA)和新复极差法(Duncan)进行不同生态恢复模式之间土壤有机碳及其活性组分的差异显著性检验(α=0.05)。

3 结果与分析

3.1 沙化草地不同生态恢复模式土壤总有机碳变化

由图 1 可知,DG 与 SGⅠ模式土壤总有机碳含量在垂直方向上的变化是先升高后降低, 5—10 cm 或 10—20 cm 土层最大;SGⅡ、SBSG 模式的与大多数土壤一致,随土层深度增加逐渐减小。除 SGⅠ的 0—5 cm 与 SGⅡ的 5—10、20—30 cm 土层土壤有机碳含量与 DG 的相应土层相近外,不同恢复模式其他土层土壤有机碳含量均增加,增幅为 15.9%—271.7%,且 SGⅠ的 0—10 cm、SGⅡ的 0—5、30—50、50—80cm 土层土壤总有机碳含量与 DG 相应土层土壤的达显著(P<0.05)。各沙化草地全剖面土壤总有机碳含量的高低顺序为 SGⅠ(5.96 g/kg)> SBSG(5.82 g/kg)> SGⅡ(3.41 g/kg)>DG(2.97 g/kg)。

3.2 沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳变化

3.2.1 微生物量碳

土壤微生物活跃土层为根系分布层次,本研究中的无生态恢复模式沙化草地仅有极少草本植物,各生态恢复模式沙化草地的植物为高原红柳与早熟禾等草本植物,根系集中分布在 20cm 土层以内,高原红柳的可达 50cm 土层。因此,本文重点分析 0—50cm 土层土壤微生物量碳(MBC)含量。由图 2 可知,3 种生态恢复模式土壤 MBC 含量的垂直变化是先升高后降低, 5—10cm 或 10—20cm 土层达最高,DG 模式的则是随土层深度的增加逐渐减小。SGⅠ、SBSG 模式各土层土壤 MBC 含量均高于 DG,增幅分别是 6.4%—55.1%,67.4%—136.6%,其中 SBSG 模式的 5—10cm 土层 MBC 含量与 DG 的达显著(P<0.05)。除 0—5 cm 土层外,SGⅡ模式的其余土层土壤 MBC 含量都略高于 DG, 增幅 2.5%—14.3%。各沙化草地全剖面土壤 MBC 含量的

高低顺序为 SBSG(44.63 mg/kg)> SGⅠ(33.42mg/kg) >SGⅡ(25.13 mg/kg)>DG(24.47 mg/kg)。

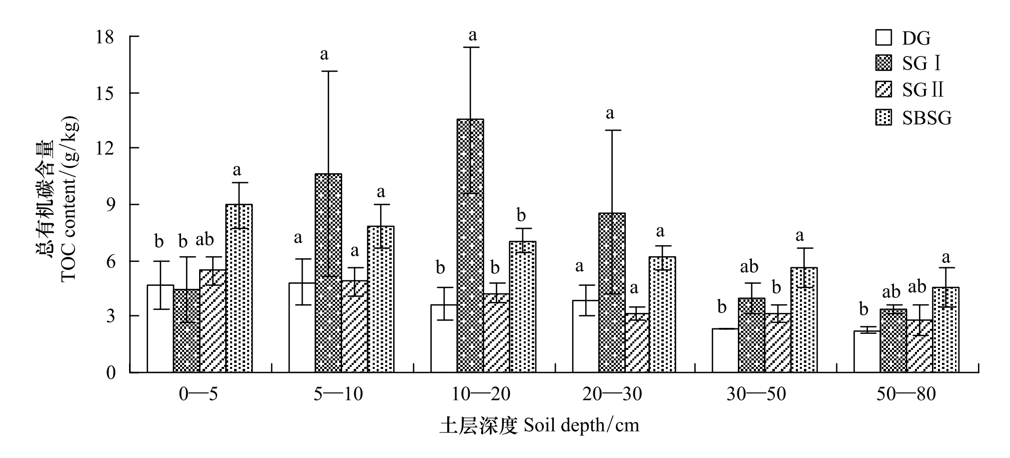


图 1　土壤总有机碳含量

Fig.1　The content of soil total organic carbon (TOC)

图中数据为平均值±标准误($n=3$)

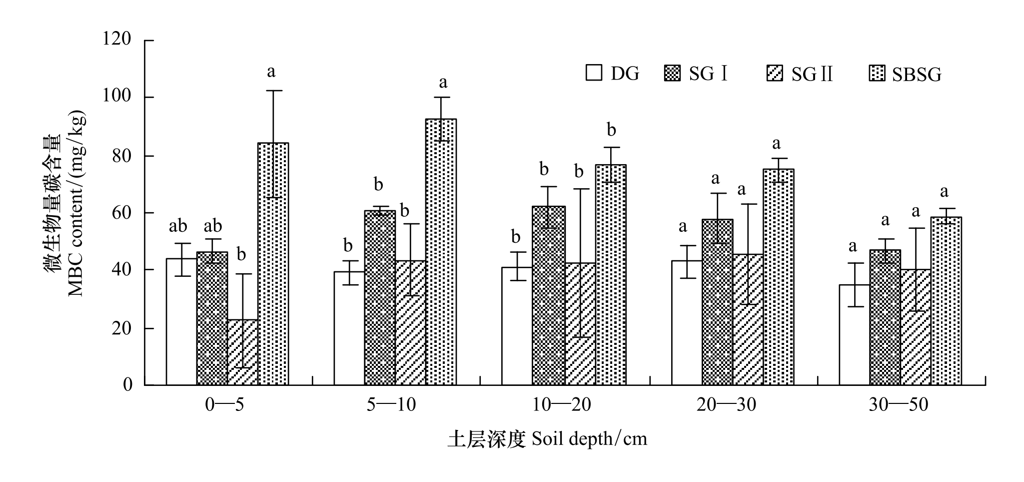


图 2　土壤微生物量碳含量

Fig.2　The content of microbial biomass carbon (MBC)

3.2.2　溶解性有机碳

图 3 显示,DG 与 SGⅡ、SBSG 模式土壤 DOC 含量在垂直方向上的变化也是先升高后降低,5—10cm 土层最高;SGⅠ模式的则是随土层深度的增加逐渐减小。SGⅠ模式各土层土壤 DOC 含量均高于 DG,增幅 45.5%—185.9%,其中 0—5、10—20、30—50、50—80cm 土层 DOC 含量与 DG 的达显著($P<0.05$)。SBSG 模式 20cm 以上的 3 层土壤 DOC 较 DG 的相应土层增加 68.9%—93.9%,20cm 以下土层土壤的与 DG 相应土层的差异极小。SGⅡ模式各土层土壤 DOC 含量却小于 DG 的相应土层。各沙化草地全剖面土壤 DOC 含量的高低顺序为 SGⅠ(38.89 mg/kg) >SBSG(19.83 mg/kg)> DG(16.27 mg/kg)> SGⅡ(9.13 mg/kg)。

3.2.3　易氧化有机碳

图 4 显示,DG 与 SGⅠ、SBSG 模式土壤易氧化有机碳(EOC)含量的垂直变化也为先升高后降低,10—20cm 土层达最高;SGⅡ模式的则是随土层深度的增加逐渐减小。SGⅠ模式各土层土壤 DOC 含量均高于 DG,增幅 47.0%—162.8%,其中 10—20、50—80cm 土层土壤 DOC 含量与 DG 的达显著($P<0.05$)。SBSG 模式各土层土壤 EOC 也均高于 DG,增幅 16.1%—90.8%。SGⅡ模式,尽管其 10—20、20—30cm 土层土壤 EOC 小于 DG,但其余土层土壤 EOC 却较 DG 的高,增幅 29.0%—87.6%。各沙化草地全剖面土壤 EOC 含量的高低顺序为 SGⅠ(2.25 g/kg) >SBSG(1.86 g/kg)> SGⅡ(1.37 g/kg)>DG(1.19 g/kg)。

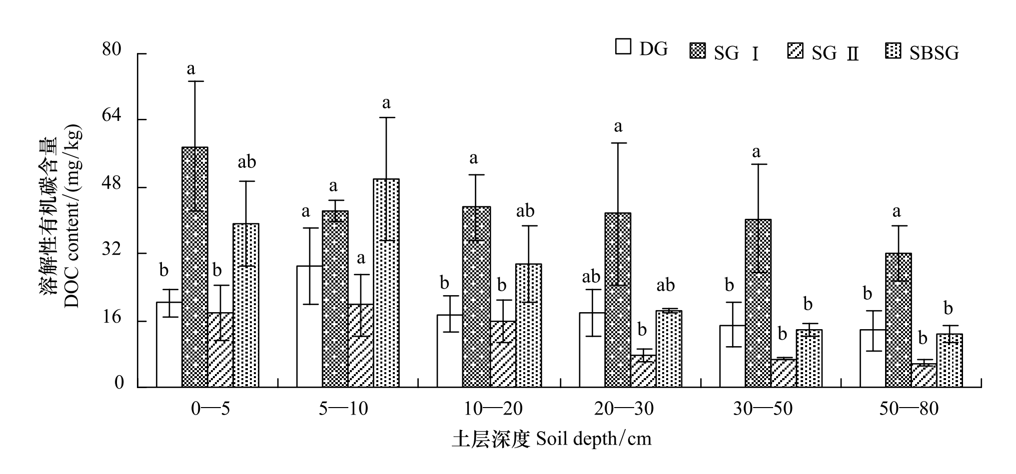


图 3 土壤溶解性有机碳含量

Fig.3 The content of dissolved organic carbon (DOC)

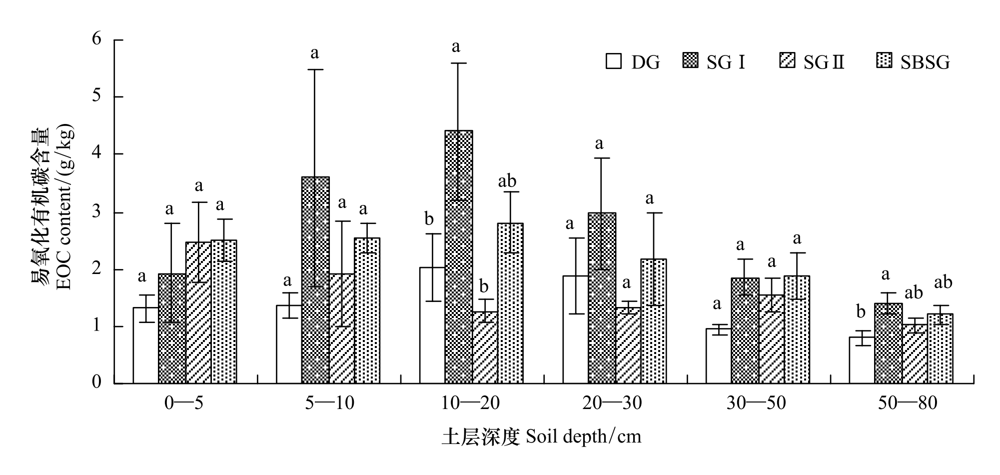


图 4 土壤易氧化有机碳含量

Fig.4 The content of easily oxidized organic carbon (EOC)

3.2.4 颗粒有机碳

图 5 显示,土壤颗粒有机碳(POC)含量在垂直方向上的变化趋势为,SG Ⅰ模式的先升高后降低, 10—20cm 土层达最高,DG、SG Ⅱ、SBSG 模式的则是随土层深度的增加逐渐减小。SG Ⅰ模式各土层土壤 POC 含量均高于 DG,增幅 61.1%—300.7%,其中 10—20cm 土层土壤 POC 含量与 DG 的达显著 ($P<0.05$)。SG Ⅱ、SBSG 模式各土层土壤 POC 含量也都高于 DG, 增幅分别为 14.3%—75.0%,110.1%—234.2%,其中 SBSG 模式的 10—20、30—50、50—80cm 土层土壤 POC 含量与 DG 的达显著。SG Ⅰ、SG Ⅱ与 SBSG 模式的全剖面土壤 POC 含量分别比 DG(1.48g/kg)高 130.9%、49.7%、170.3%。各沙化草地全剖面土壤 POC 含量的高低顺序为 SBSG(3.99 g/kg)>SG Ⅰ(3.41 g/kg) > SG Ⅱ(2.21 g/kg)>DG(1.48 g/kg)。

3.3 沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳分配比例变化

土壤某种活性有机碳的分配比例是指该种活性有机碳与总有机碳的比例。统计结果显示,研究区沙化草地土壤活性有机碳分配比例的垂直变化无明显规律可循,故表 2 只列了土壤活性有机碳分配比例的变化范围及全剖面均值。土壤 MBC 的分配比例也称微生物熵,反映了输入土壤中有机物向微生物量碳的转化效率,值越大,转化率越大,微生物对有机碳的利用率越高。由表 2 可知,总体上,供试土壤微生物熵较低,变幅 0.09%—2.18%,全剖面的微生物熵值略高于 1.00%。与 DG 相比,3 种生态恢复模式土壤微生物熵略有降低,但差异不显著。低温、干旱环境致使研究区土壤 DOC 分配比例变化范围仅为 0.16%—1.62%,还低于微生物熵。与 DG 相比,SG Ⅰ模式的全剖面土壤 DOC 分配比例明显增加,SG Ⅱ、SBSG 模式的则相反。同时,SG Ⅰ模

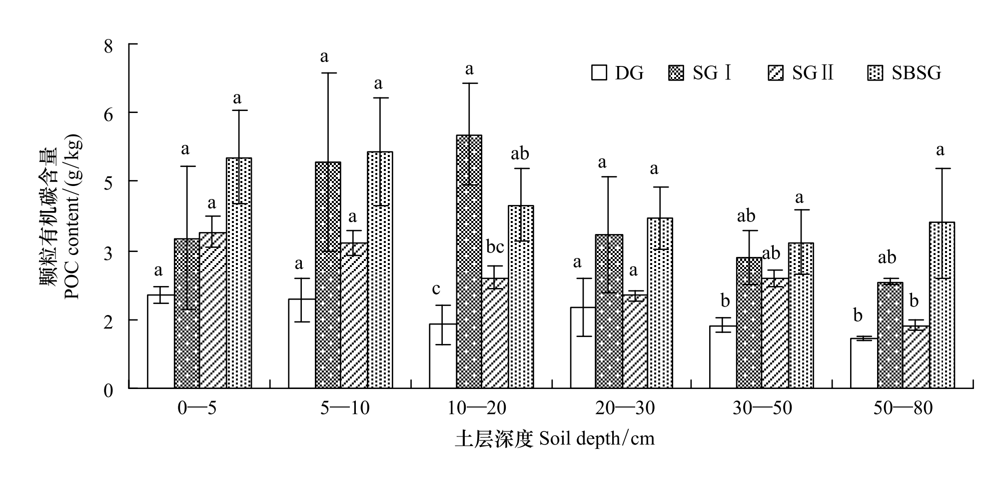


图 5　土壤颗粒有机碳含量

Fig.5　The content of particulate organic carbon (POC)

式土壤 DOC 分配比例的垂直变化出现分馏现象[25]:表层(0—5 cm),化学结构更复杂的 DOC 组分被土壤优先吸附和截留,土壤 DOC 分配比例 1.95%,是 DG 模式相应土层土壤的 3.65 倍;深层(30cm 以下),结构更简单的 DOC 组分则淋溶至此,土壤 DOC 分配比例变化范围 0.93%—0.97%,是 DG 模式相应土层土壤的 1.51—1.63倍。土壤 EOC 分配比例变化范围为 13.68%—68.88%,远远高于微生物熵与 DOC 分配比例。相较于 DG,SGⅠ、SGⅡ模式的全剖面土壤 EOC 分配比例有所增加,SBSG 模式的则明显降低。土壤 POC 分配比例变化范围是 11.76%—88.59%,不仅高于 EOC 分配比例,还远远大于微生物熵与 DOC 分配比例。3 种生态恢复模式的全剖面土壤 POC 分配比例分别比 DG 模式的增加 22.92%、26.46%、25.73%。

表 2　土壤活性有机碳占总有机碳的比例

Table 2　The distribution proportion of soil labile organic carbon

指标 Index	DG		SGⅠ		SGⅡ		SBSG	
	范围 Range	全剖面 Whole profile	范 围 Range	全剖面 Whole profile	范 围 Range	全剖面 Whole profile	范 围 Range	全剖面 Whole profile
MBC :TOC/%	0.58—2.06	1.28	0.09—2.18	1.06	0.29—2.12	1.10	0.70—1.41	1.14
DOC :TOC/%	0.20—1.15	0.58	0.19—1.62	0.87	0.16—0.65	0.26	0.18—0.79	0.34
EOC :TOC/%	20.02—59.43	40.10	21.68—56.12	41.91	16.19—68.88	44.10	13.68—64.23	32.79
POC :TOC/%	11.76—86.53	54.44	32.94—88.59	66.92	39.67—86.32	68.85	38.45—80.49	68.43

TOC:总有机碳 Total organic carbon; MBC:微生物量碳 Microbial biomass carbon; DOC:溶解性有机碳, Dissolved organic carbon; EOC:易氧化有机碳 Easily oxidized organic carbon; POC:颗粒有机碳 Particulate organic carbon

3.4　沙化草地不同生态恢复模式土壤碳库管理指数变化

由表 3 可知,3 种恢复模式土壤碳库活度指数(CA)在 0.35—2.05 之间,且超过半数以上的土层土壤 CA 值小于 1;土壤 CA 无明显的垂直变化规律;SGⅠ、SGⅡ模式全剖面土壤 CA 值大于 1,SBSG 的仅为 0.77。尽管 3 种恢复模式土壤碳库指数(CPI)垂直变化也无明显规律可循,但除 SGⅠ模式的 0—5 cm 土层、SGⅡ模式的 5—10 cm 土层、20—30 cm 土层小于或等于 1,其余土层的均大于 1;3 种恢复模式土壤全剖面 CPI 均大于 1,其大小顺序为 SGⅠ>SBSG>SGⅡ,与 TOC、EOC 一致。虽然 3 种恢复模式土壤 CPMI 垂直变化规律与 CA、CPI 相似,但也仅 SGⅡ模式的 10—20 cm 土层、20—30 cm 土层小于 100%,其余土层的都大于 100%;3 种修复模式土壤全剖面 CPMI 值均大于 100%,其大小按 SGⅠ、SGⅡ、SBSG 的顺序减小。可见,沙化草地的 3 种生态恢复模式都不同程度地提高了土壤质量。

表 3 土壤碳库管理指数及相关指标

Table 3 The value of soil carbon pool management index (CPMI) and related indexes

指标 Indexes	生态恢复模式 Ecological restoration pattern	土层深度 Soil depth /cm						全剖面 Whole profile
		0—5	5—10	10—20	20—30	30—50	50—80	
碳库活度指数	SGⅠ	1.29	0.95	0.52	0.81	1.40	1.21	1.11
Carbon activity (CA)	SGⅡ	1.65	1.29	0.35	0.93	2.05	1.69	1.49
	SBSG	0.80	1.01	0.70	0.86	0.85	0.68	0.77
碳库指数	SGⅠ	0.94	2.18	3.72	2.23	1.70	1.48	1.92
Carbon pool index(CPI)	SGⅡ	1.16	1.00	1.17	0.81	1.36	1.22	1.18
	SBSG	1.71	1.62	1.75	1.85	1.91	1.72	1.78
碳库管理指数/%	SGⅠ	124.3	207.8	161.1	137.9	226.0	180.9	182.5
Carbon pool management	SGⅡ	188.2	150.0	41.1	70.6	248.7	159.5	157.1
index (CPMI)	SBSG	127.4	150.5	112.2	159.1	150.7	109.3	129.9

3.5 沙化草地土壤活性有机碳组分、碳库管理指数与其他性质的相关性

土壤活性有机碳组分、碳库管理指数与有机质、氮磷素的相关性统计结果(表 4)显示,土壤各活性有机碳组分、CPMI 均与有机质、氮磷素呈正相关。土壤 MBC 与全氮、全磷、微生物量磷的相关系数达显著或极显著,与碱解氮的在 10%水平上显著; DOC 与有机质、全氮、全磷、碱解氮、微生物量磷的相关系数达显著或极显著,与速效磷的在 10%水平上显著;EOC、POC 与有机质、全量氮磷、有效氮磷、微生物量氮磷的相关系数均达显著或极显著。可见,本研究中的 MBC、DOC、EOC 与 POC 均能指示沙化草地土壤养分肥力的变化,尤其是 EOC 与 POC。土壤 CPMI 与各养分指标的相关系数,仅与微生物量氮达显著,与有机质在 10%水平上显著。但统计结果又显示,本研究中土壤 CPMI 与 EOC、POC 与相关系数分别为 0.630($P<0.001$)、0.235($P<0.05$),达极显著、显著,间接表明土壤 CPMI 也可用于表征生态恢复措施对沙化草地土壤质量的影响。

表 4 土壤活性有机碳、碳库管理指数与其他土壤性质的相关性

Table 4 The correlation between soil labile organic carbon, CPMI and other properties

指标 Indexes	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Available nitrogen	微生物量氮 Microbial biomass carbon	全磷 Total phosphorus	速效磷 Available phosphorus	微生物量磷 Microbial biomass phosphorus
MBC	0.431**	0.298*	0.237(*)	0.082	0.535**	-0.006	0.350*
DOC	0.475**	0.505**	0.492**	0.026	0.255*	0.204(*)	0.369**
EOC	0.831**	0.594**	0.574**	0.595**	0.410**	0.315**	0.380**
POC	0.802**	0.513**	0.393**	0.306*	0.417**	0.329**	0.511**
CPMI	0.257(*)	0.165	0.186	0.349*	0.121	0.206	0.143

* $P<0.1$; * $P<0.05$; ** $P<0.01$

4 讨论

4.1 沙化草地不同生态恢复模式提高土壤有机碳效应的差异

土壤有机碳含量取决于有机物料输入和损失量的差值,输入量大于损失量,有机碳含量升高,反之降低。本研究显示,SGⅠ、SGⅡ、SBSG 模式土壤全剖面总有机碳含量分别比 DG 高 100.6%、14.7%、96.0%。可见,3 种恢复模式均能不同程度地提高了沙化草地土壤总有机碳含量,与彭佳佳等[19]、史长光等[19]、周家福[18]之前在红原一带的研究结果一致。这归功于 3 种恢复模式都能防风固沙,增加水分入渗[26-27],提供适合植物生长的基本土壤条件,从而增大土壤中枯落物的归还量与地下根系量及其根系分泌物量、微生物数量[28],最终致使有机物料的输入量高于矿化分解损失量。不同恢复模式提高土壤总有机碳含量的效应不一致,SGⅠ、SBSG 模式土壤总有机碳含量分别比 SGⅡ模式的高 74.9%、70.9%,表明灌草间作模式Ⅰ与沙障+灌草模式提

高土壤有机碳的效果相近,但都优于灌草间作模式Ⅱ。

本研究中,SGⅠ、SGⅡ与SBSG模式的全剖面土壤MBC含量分别比DG高36.6%、2.7%、82.4%,DOC含量分别比DG高139.0%、-43.9%、21.8%,EOC含量分别比DG高89.4%、15.0%、56.2%,POC含量分别比DG高130.9%、49.7%、170.3%。这表明总体上3种恢复模式土壤各组分活性有机碳含量均较DG有不同程度的增加,与沙化草地高山红柳间植草本植物模式在瓦切乡的试验效果一致[17],与其他地区的植被恢复措施可有效提高土壤活性有机碳效应的结论相似[29-30]。不同恢复模式提高土壤活性有机碳效应不一致,其中提高土壤MBC、DOC、POC的效应大小为,SBSG > SGⅠ >> SGⅡ;提高土壤EOC的效应大小则为,SGⅠ > SBSG >> SGⅡ。综合分析3种恢复模式的恢复年限(表1),以及全剖面土壤4种活性有机碳含量不难发现,沙障+灌草模式是一种效果最佳的沙化草地生态恢复模式。这是因为方形高原红柳等树枝沙障能固沙,方形沙障中的高原红柳成条带状与早熟禾等草本植物不仅可固沙防风,还能阻止外源沙,进而营造一适合植物生长发育的土壤环境,生长较好植物又可向土壤中输入较多有机物,促进有机碳及活性组分的增加,如此循环,可快速恢复亚高山(灌丛)草甸生态环境。

与相关研究结果[17-19]相比,若尔盖沙化草地土壤总有机碳及其活性组分含量的垂直分布规律不全是随土层深度增加而减小,如DG模式的TOC、DOC、EOC含量,SGⅠ模式的TOC、MBC、EOC、POC含量,SGⅡ模式的MBC、DOC含量,SBSG模式的MBC、DOC、EOC含量是先增加后减小,大致在5—10 cm土层或10—20 cm土层最大。这与蔡晓布等[16,31]对藏北高原的高寒正常草地与沙化草地土壤的研究结论相似。因为沙区的风蚀、风积作用[32-33]导致表层土壤砂粒多于亚表层,即使是生态恢复模式下的土壤仍存在这种风蚀、风积作用,由此带给土壤性质的负效应远大于正效应。

4.2　沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳分配比例的差异

研究区的低温、干旱环境使得土壤微生物熵、DOC分配比例均较低,变化范围分别为0.09%—2.18%、0.16%—1.62%。其中微生物熵低于内蒙古科尔沁沙化草地土壤(1.7%—4.8%)[29];DOC分配比例与内蒙古锡林河流域草地土壤的(0.32%—1.09%)相似[34],高于藏北高原正常与沙化草地土壤(<0.1%)[31]。但这一独特的低温、干旱、砂土质地条件却有助于输入土壤中的有机物向EOC、POC转化。土壤EOC、POC分配比例变化范围分别为13.68%—68.88%、11.76%—88.59%,远远高于微生物熵与DOC分配比例。其中土壤EOC分配比例高于蔡晓布等[31]在藏北高原沙化与围栏封育草地土壤(17.0%—22.5%),可能是藏北高原土壤总有机碳较高,大多在6.0g/kg—10.0g/kg之间,而本研究中土壤总有机碳较低,大部分变幅在2.0—6.0g/kg。土壤POC分配比例高于杨新国等[30]在宁夏盐池的沙化草地土壤(28.7%—63.6%),这是因为研究区的土壤颗粒组成中以砂粒(2—0.02mm)为主,变幅8.20%—95.83%[35-36],与有机碳结合的绝大多数土壤颗粒是砂粒,造就了土壤POC的高分配比例。

3种生态恢复模式的全剖面土壤微生物熵均较DG模式的略有降低,且不同生态恢复模式之间无显著差异,说明不同生态恢复模式下,输入土壤中有机物转化成微生物碳的速率低于无生态恢复措施土壤,其微生物熵的增大还有赖于恢复年限的增加引起土壤中体积<5—105μm活的细菌、真菌、藻类和微动物的增多。3种生态恢复模式的全剖面土壤POC分配比例都高于DG模式,增幅22.92%—26.46%。表明仍处于砂土质地条件的各生态恢复模式,其输入土壤中有机物向POC转化量较多,速度也较快,但不同生态恢复模式之间无显著差异。各生态恢复模式全剖面土壤DOC、EOC与DG的差异则因沙化草地不同生态恢复模式及其恢复年限的差异不一致。SGⅠ模式的恢复年限已达7年,输入有机物转化成DOC的量不仅多,速率也可能较大,致使土壤DOC分配比例明显高于DG,垂直变化出现分馏现象[25]。SGⅡ模式的恢复年限虽也达7a,但4—5行高山红柳为环状栽植,防风固沙能力较弱,输入有机物转化成DOC的量不仅少,速率也可能较低,致使土壤DOC分配比例低于DG。SBSG模式的则因恢复年限较低导致土壤DOC分配比例也低于DG。也正是因为恢复年限的差异(表1),SGⅠ、SGⅡ模式的全剖面土壤EOC分配比例较DG有所增加, SBSG模式的则明显低于DG。

4.3 沙化草地土壤活性有机碳及碳库管理指数对土壤质量的表征作用

土壤 CPMI 从有机碳库的角度反映不同土壤环境条件下土壤质量的差异以及人工生态恢复措施提升土壤质量的能力[9,31]。本研究结果显示,SGⅠ、SGⅡ、SBSG 模式的全剖面土壤 CPMI 分别为 182.5%、157.1%、129.9%,均大于 100%。可见,3 种恢复模式均能不同程度地提升土壤质量,这与邱莉萍等[12]、Gong 等[9]的研究结论相似;同时,由于恢复年限的差异(表 1),3 种恢复模式提升土壤质量的能力大小为,灌草间作模式Ⅰ>灌草间作模式Ⅱ>沙障+灌草模式。表明沙障+灌草模式提高土壤有机碳效应虽较灌草间作模式Ⅱ高,但易氧化有机碳的增加量相对少于难氧化有机碳,导致其有机碳质量(碳素有效性)反而低于灌草间作模式Ⅱ。

大量研究表明,土壤活性有机碳组分、碳库管理指数与大多数物理、化学、生物性质呈显著相关,可作为表征土壤质量对水、肥、耕作等管理措施与覆被变化等土壤环境条件变化的早期灵敏反应指标[9-12,37]。本研究结果显示,土壤 MBC、DOC、EOC 与 POC 基本都与有机质、氮磷呈显著正相关,可指示沙化草地土壤养分肥力变化,与邱莉萍等[12]、Gong 等[9]等的研究结论相似。土壤 CPMI 与微生物量氮、EOC、POC 呈显著或极显著正相关,与有机质在 10%显著水平上呈正相关。表明 CPMI 仍可在一定程度上用于表征生态恢复措施对沙化草地土壤质量的影响,与 Gong 等[9]等的研究结论相似。综合比较各活性有机碳与土壤养分的相关性,以及各活性组分的测定方法,本研究认为土壤 EOC 不仅测定方法简单、工序少、省时,而且能在短时间内变化较大,可作为反映生态恢复措施对沙化草地土壤质量影响的优选指标。

5 结论

3 种恢复模式均不同程度地提高了土壤总有机碳及其活性组分的含量。与 DG 相比,3 种恢复模式土壤活性有机碳的增幅为 2.7%—139.0%。不同恢复模式提高土壤有机碳效应的大致趋势是,灌草间作模式Ⅰ≈沙障+灌草模式>>灌草间作模式Ⅱ。

高寒、干旱环境条件以及砂土质地使得沙化草地土壤微生物熵、DOC 分配比例较小,EOC、POC 分配比例则较高。3 种生态恢复模式土壤活性有机碳分配比例与 DG 的差异表现不一致,显著体现是 SGⅠ模式土壤 DOC 分配的垂直变化出现分馏现象。

3 种生态恢复模式 CPMI 均大于 100%,能不同程度地提升土壤质量,其效应大小为,灌草间作模式Ⅰ(CPMI,182.5%)>灌草间作模式Ⅱ(CPMI,157.1%)>沙障+灌草模式(CPMI,129.9%)。易氧化有机碳可作为反映沙化草地不同生态修复模式土壤质量变化的优选指标,CPMI 也可用于表征生态恢复措施对沙化草地土壤质量的影响。

参考文献(References):

[1] 蔡晓布, 周进. 退化高寒草原土壤有机碳时空变化及其与土壤物理性质的关系. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2639-2645.

[2] Miralles I, Ortega R, Almendros G, Sánchez-Marañón M, Soriano M. Soil quality and organic carbon ratios in mountain agroecosystems of South-east Spain. Geoderma, 2009, 150(1/2): 120-128.

[3] 孟令阳, 辛术贞, 苏德纯. 不同惰性有机碳物料对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1531-1538.

[4] Gharbi L T, Merdy P, Lucas Y. Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part II: Role of organic carbon on Cu, Pb and Cr behaviour. Applied Geochemistry, 2010, 25(11): 1711-1721.

[5] 张明园, 魏燕华, 孔凡磊, 陈阜, 张海林. 耕作方式对华北农田土壤有机碳储量及温室气体排放的影响. 农业工程学报, 2012, 28(6): 203-209.

[6] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma, 2004, 123(1/2): 1-22.

[7] Wardle D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. Biological Reviews, 1992, 67(3): 321-358.

[8] Garten C T Jr, Post III W M, Hanson P J, Cooper L W. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian mountains. Biogeochemistry, 1999, 45(2): 115-145.

[9] Gong W, Hu T X, Wang J Y, Gong Y B, Ran H. Soil carbon pool and fertility under natural evergreen broadleaved forest and its artificial

regeneration forests in southern Sichuan Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2536-2545.

[10] Vieira F C B, Bayer C, Zanatta J A, Dieckow J, Mielniczuk J, He Z L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. Soil & Tillage Research, 2007, 96(1/2): 195-204.

[11] 李硕, 李有兵, 王淑娟, 师江澜, 田霄鸿. 关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1215-1222.

[12] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民. 不同封育年限草地土壤有机质组分及其碳库管理指数. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1166-1171.

[13] Da Silva F D, Amado T J C, Ferreira A O, Assmann J M, Anghinoni I, de Faccio Carvalhod P C. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop-livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 190: 60-69.

[14] Luo S S, Zhu L, Liu J L, Bu L D, Yue S C, Shen Y F, Li S Q. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to soil surface mulching in semiarid farmland. European Journal of Soil Biology, 2015, 67: 35-42.

[15] 张顺谦, 郭海燕, 罗勇. 气候变化和载畜量对若尔盖草地沙化的驱动力评价. 中国草地学报, 2007, 29(5): 64-71.

[16] 蔡晓布, 彭岳林, 于宝政, 刘合满. 不同状态高寒草原主要土壤活性有机碳组分的变化. 土壤学报, 2013, 50(2): 315-323.

[17] 彭佳佳, 胡玉福, 蒋双龙, 肖海华, 蒲琴. 生态恢复对川西北沙化草地土壤活性有机碳的影响. 水土保持学报, 2014, 28(6): 251-255.

[18] 周家福. 川西北沙化草地生态恢复过程中植被与土壤变化研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.

[19] 史长光, 泽柏, 杨满业, 肖冰雪. 川西北沙化草地植被恢复后土壤理化性质的变化. 草业与畜牧, 2010,(4): 1-4, 32-32.

[20] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(5): 991-999.

[21] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459-1466.

[22] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006.

[23] 孙玉桃, 廖育林, 郑圣先, 聂军, 鲁艳红, 谢坚. 长期施肥对双季稻种植下土壤有机碳库和固碳量的影响. 应用生态学报, 2013, 24(3): 732-740.

[24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[25] Kaiser K, Kalbitz K. Cycling downwards-dissolved organic matter in soils. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 52: 29-32.

[26] 蒙嘉文, 左林, 蔡应君, 邓东周, 鄢武先. 若尔盖县土地沙化现状分析及治理对策研究. 四川林业科技, 2013, 34(4): 42-46.

[27] 肖冰雪, 陈琴, 杨满业, 向锦, 吴凯. 若尔盖辖曼牧场沙化草地植被恢复与重建技术综述. 草业与畜牧, 2008, (7): 60-61.

[28] 金晶, 曹致中, 曹毅. 人工恢复沙化草地的土壤微生物和酶活性的研究. 草原与草坪, 2011, 31(1): 84-88.

[29] 尚雯, 李玉强, 韩娟娟, 赵学勇, 张铜会, 罗永清, 王少昆. 围封对流动沙丘表层土壤有机碳、全氮和活性有机碳的影响. 水土保持学报, 2012, 26(6): 147-152.

[30] 杨新国, 宋乃平, 李学斌, 刘秉儒. 短期围栏封育对荒漠草原沙化灰钙土有机碳组分及物理稳定性的影响. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3325-3330.

[31] 蔡晓布, 于宝政, 彭岳林, 刘合满. 高寒草原土壤有机碳及土壤碳库管理指数的变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7748-7755.

[32] 张法伟, 李英年, 汪诗平, 赵新全. 青藏高原高寒草甸土壤有机质、全氮和全磷含量对不同土地利用格局的响应. 中国农业气象, 2009, 30(3): 323-326.

[33] 王文颖, 王启基, 鲁子豫. 高寒草甸土壤组分碳氮含量及草甸退化对组分碳氮的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(5): 647-654.

[34] 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛. 温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应. 环境科学, 2014, 35(8): 3073-3082.

[35] 胡玉福, 彭佳佳, 邓良基, 肖海华, 蒋双龙, 马可雅. 围栏种植红柳对川西北高寒沙地土壤颗粒组成和矿质养分的影响. 土壤通报, 2015, 46(1): 54-61.

[36] 舒向阳, 胡玉福, 蒋双龙, 蒲琴, 袁铖铭, 彭佳佳. 川西北草地沙化对土壤颗粒组成和土壤磷钾养分的影响. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 173-179.

[37] 邓少虹, 林明月, 李伏生, 苏以荣, 刘坤平. 施肥对喀斯特地区植草土壤碳库管理指数及酶活性的影响. 草业学报, 2014, 23(4): 262-268.